

## 6. プレートテクトニクス

### 6-1 大陸移動説と海洋底拡大説

プレートテクトニクス理論とは？ テクトニクス≡構造地質。地殻の三次元的な構造と、それらの変化過程や駆動力を合わせた概念。プレートテクトニクス理論では、惑星が複数枚のプレートで覆われており、それらの相対運動に起因して地殻の構造やその変化過程が起こるとする。広く受け入れられるまでには紆余曲折があった。

**1912年** 気象学者ウェゲナーが1912年の著書「大陸と海洋の起源」で大陸移動説を提唱。大西洋兩岸の海岸線の形の類似、氷河の痕跡の分布、古生物の分布を論拠とした。

原動力が不明だったこと、あまりに革命的な考えだったことから広く認められるに至らなかった。1920年代にはホームズがマントル対流による説明(現在広く受け入れられている)を提唱した。

**1950年代後半** 大陸移動説が復活。仮想的地磁気極の方法によって白亜紀以前に大西洋が閉じていれば北米とヨーロッパでそれぞれ得られた極移動曲線が説明できることが分かった(アービングやランコーンらが研究)。

**1960年代初頭** 海洋底拡大説。ヘスやディーツが海山列などの地質の解釈から海底は中央海嶺で生まれ、海溝で沈み込んでゆくという仮説を提唱。さらにバインとマシューが海底地殻残留磁気の縞模様を海洋底拡大で説明。

**1960年代後半から70年代初頭** 深海掘削計画によって海底基盤の年齢が中央海嶺から遠ざかるほど古いことが実証された。環太平洋地域の巨大地震時の岩盤のスリップの向き、中央海嶺のトランスフォーム断層の走向などが球面上のプレートの相対運動を仮定することによって説明できることを示した(マッケンジー、パーカー、モーガン、ルピションら)。

**現在** GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) や VLBI (Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干渉法) の観測によってプレート相対運動が常時観測されている。

### 6-2 基本概念

**プレートの定義** 剛体的に運動している地球表面の各ブロックのこと。

地殻変動（岩盤の変形）はプレートの境界部に集中．移動速度の典型的な値は数 cm/年．

現在の地球には全部で 10 個ほどある．太平洋プレートは其中で最大の面積を持つ．

プレートのうち大陸地殻に覆われている部分を**大陸プレート**，海洋地殻に覆われている部分を**海洋プレート**という．

**リソスフェア** プレートの実体で，地殻とマントルの上部を含む表面から厚さ約 70～150 キロの岩石層を言う．より深部よりも低温なことで水分に乏しいことの二重の効果で粘性率が高く剛体的に振舞う<sup>1</sup>．

**アセノスフェア** リソスフェアの下部にある柔らかい厚さ 75km ほどの層．熱と水分の効果で粘性率が低い．地震学的に低速層として認識される．プレートはこの層の上を滑り動いている<sup>2</sup>．

**メソスフェア** より深部にある水平運動の乏しい層．核マントル境界まで続いているという説もある．ハワイなどの**ホットスポット**の起源領域．

**プレート境界** 収束型，発散型，平行移動型の 3 つに分けられる．

### 6-3 プレート境界

**発散型境界** 二つのプレートが互いに遠ざかるように運動する境界．すき間を埋めるように地下からマントル物質が上昇し，海洋プレートが成長する．

その現場が**中央海嶺**．アイスランドはそれが海面上に顔を出したもの．

海嶺では地下から上昇するマントルが部分的に融けて玄武岩が生じ，海洋地殻を形成する．海洋底の地殻残留磁気はこのとき獲得される．

誕生した海洋プレートは時間とともに冷えて密度が増すため，海嶺から遠ざかるにつれてアイソスタシーの関係を満たすように少しずつ沈降する．これが海洋の発散型境界が周囲より盛り上がっている理由．またこの密度の増加による自重がプレート運動の原動力の一部になっている．

大陸地殻内に発達した発散型境界では逆に沈降が生じて**地溝帯**をつくる．

**平行移動型境界** 二つのプレートが水平にずれあうように運動する．**トランスフォーム断層**が形成される．ロサンゼルス州のサンアンドレアス断層は陸上に顔を出した例．

海嶺は多数のトランスフォーム断層で区切られている (断裂帯)．

<sup>1</sup>英語で lithosphere と記す．“litho”は「岩石」を意味する接頭辞．

<sup>2</sup>asthenosphere: “astheno”=「軟弱な」

**収束型境界** 二つのプレートが接近するように運動する。衝突型境界ともよばれる。一方のプレートが他方のプレートの下にもぐりこむ。

大陸プレートと海洋プレート、あるいは海洋プレート同士がぶつかると（一方の）海洋プレートがその下にもぐり込む<sup>3</sup>。

この現象を**沈み込み**、沈み込みの起きている領域を**沈み込み帯**、沈み込んだプレートを**スラブ**と呼ぶ。

沈み込み帯には弧状に海溝が形成される<sup>4</sup>。

沈み込み帯には火山活動が生じる他、海洋堆積物や海洋地殻の一部が沈み込み帯の入り口にとり残され、列島が成長する。これを**島弧**と呼ぶ。

大陸プレート同士が衝突すると地殻が水平方向に圧縮され造山運動が起こる。ヒマラヤ山脈はインド大陸とユーラシア大陸の衝突によりできた。

## 6-4 プレートテクトニクスによる地震発生の理解

**予備知識** 地震を理解するための予備知識をまとめる。

- 断層：地震=地殻・マントルが一部壊れる現象。面にそって破壊が起こることが多い。この破壊面を断層という。
- ずれ方による断層の分類：正断層=水平引っ張り力による上下ずれ，逆断層=水平圧縮力による上下ずれ，左横ずれ断層=断層の向こう側が左側に運動，右横ずれ断層=右へ運動。
- マグニチュード：地震の規模を表す数字。現在世界的に良く用いられるのはモーメントマグニチュードで断層面の面積×断層変位×剛性率の積を地震モーメント  $M_0$ [単位は N·m] とよび， $M = (\log_{10} M_0 - 9.1)/1.5$  と定義される。金森博雄が考案。

**震源分布の特徴** 地理分布と深さ分布に着目すると

- 地理分布：帯状に分布(**地震帯**という)。プレート境界に対応する。
- 深さ分布：発散型・平行移動型境界では浅発地震(震央の深さ <100km)のみ。収束型境界では浅発地震に加え深発地震(震央の深さ >100km)も起こる。

**収束型境界での発震機構** 収束型境界では人間に被害をもたらす大地震がしばしば起こる。発震機構はいくつかに分類される。

<sup>3</sup>海洋プレートの方が平均密度が高いためと考えられる

<sup>4</sup>弧状になるのは球殻の一部をへこませると円形にへこむのと同じ物理によるらしい(ピンポン玉を想像すること)

- 海溝型地震：沈み込む海洋プレート（スラブ）が摩擦力で大陸プレートを引きずり込むが歪（ひずみ）が十分大きくなると大陸プレートが跳ね上がる．このタイプの地震はマグニチュードの非常に大きなものになることがある（60年チリ地震  $M9.5$ ，64年アラスカ地震  $M9.2$ ，04年スマトラ地震  $M9.1$ ，11年東北太平洋沖地震  $M9.0$  など）
- スラブ内地震：スラブ内部で生じる地震．震源は上下2面に分布し，上側は沈み込みの方向に対して圧縮，下側は引っ張りの断層運動になっている．海溝型・スラブ内地震の震源のつくる面を深発地震面または和達ベニオフ帯という．
- 内陸型地震：陸側プレートの浅い部分で起こる地震．大局的にはプレート同士の圧縮力が原因．しかし個々には圧縮だけでなく横ずれや引っ張り力による地震も起こる．現在まで繰り返し活動している断層を活断層という．最近の発生例は95年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災） $M7.3$  や04年新潟県中越地震  $M6.8$  など．
- ゆっくり地震：数時間から数日以上かけてじわじわ動く地震．海溝型地震とともにプレートの沈み込み運動に寄与している．
- アウターライズ地震：海溝外縁隆起帯で生じる地震．震源が浅い時は引っ張り，深い場合は圧縮の断層運動を起こす．陸地での揺れが小さくても，大規模な津波を起こす場合がある（33年昭和三陸地震  $M8.1$ ）．

## 問題

問題番号に★が一つ付けてあるものは難しいが現在の知識でもきちんと考えれば解ける問題．★が二つのものは現在の知識+アルファが必要な挑戦問題．

### 6.1 海洋リソスフェアの冷却について以下の問いに答えよ．

(1) 厚さ  $100\text{km}$  の海洋リソスフェアの温度が平均で  $100^\circ\text{C}$  低下した場合，アイソスタシーの考えを用いてその沈降の大きさを求めよ．ただし  $1^\circ\text{C}$  あたりの密度変化の割合は  $10^{-5}$  である．すなわち，温度が  $n^\circ\text{C}$  下がると，もとの密度に  $(1 + 10^{-5}n)$  を乗じた密度へ変化する．海洋リソスフェア密度はマントル上部の密度（図表等から調べること）で代表してよい．

(2) 太平洋中央海嶺の平均水深は  $2700\text{m}$ ，太平洋中央部の平均水深は  $4000\text{m}$  である．プレートの平均温度が何度低下すればこの水深の差が説明できるか計算せよ．ここでもプレートの厚さは  $100\text{km}$  とする．

### 6.2 太平洋プレートのもっとも古い領域は2億年前に形成された．海底の年代図（図1）と火山島と海山の年代図（図2）を用いて，太平洋プレートの最近2000万年間の運動速度を求めよ．またこの2億年間で太平洋プレートの運動速度はほぼ一定だったかそれとも変化したか．

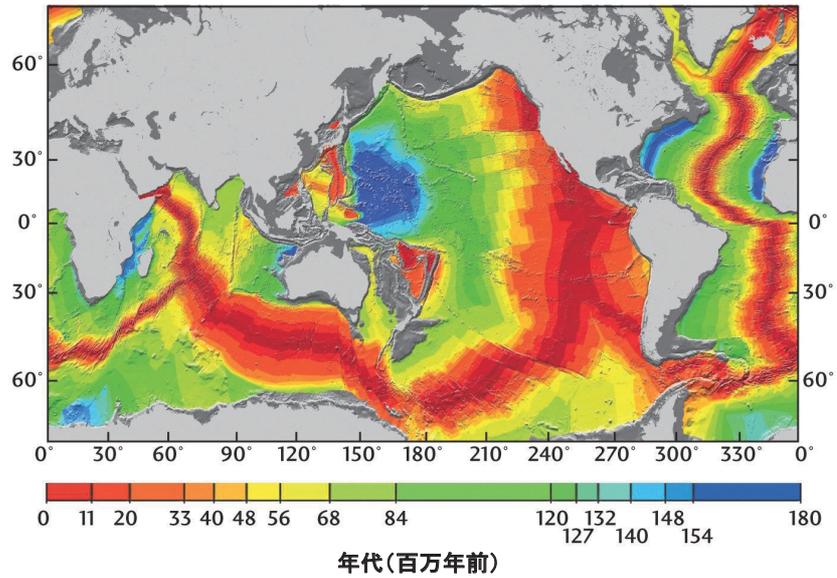


図1 海洋プレートの年代地図

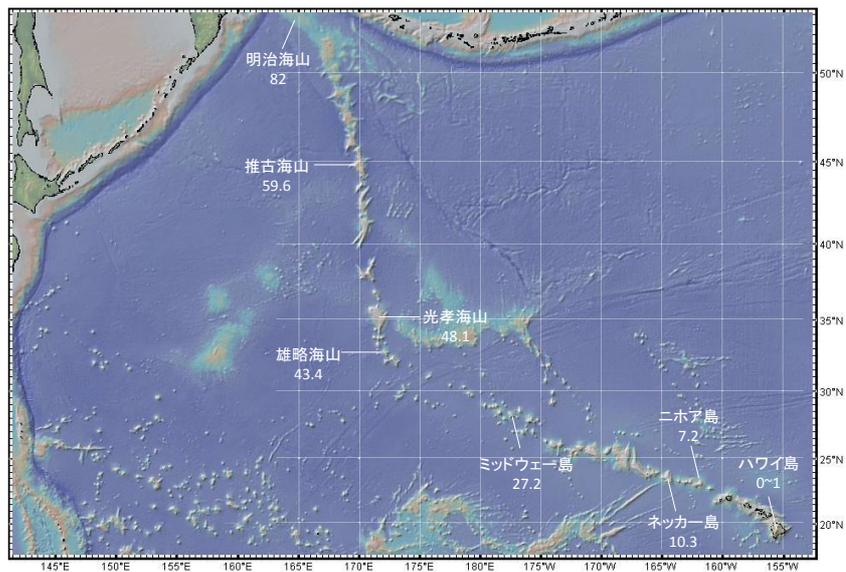


図2 火山島と海山の形成年代. 数字の単位は100万年である.

**6.3** 地震のマグニチュード  $M$  と地震で開放される総エネルギー  $E[\text{J}]$  には  $\log_{10} E = 1.5M + 4.8$  という関係がある. 以下の問いに答えよ.

(1) マグニチュードが0.1あるいは1.0大きくなると, エネルギーはそれぞれ何倍大きくなるか.

(2) マグニチュードがおよそ 8 を超える地震は巨大地震と呼ばれる。マグニチュード 8 の地震のエネルギーを求め、このエネルギーがわが国の平均的な 1 世帯あたり 1 年間のエネルギー消費量  $5 \times 10^{10} \text{J}$  の何倍にあたるか求めよ。

(3) 1923 年の関東地震のマグニチュードは 7.9 で断層の長さ・幅・変位はそれぞれ 95km, 54km, 4.8m であった。1960 年のチリ地震のマグニチュード 9.5 と変位量 24.1m から、チリ地震の断層の面積をもとめ、関東地震のものと比較せよ。ただし剛性率は同じとする。

**6.4** 以下に挙げる各プレート境界に形成されるもっとも主要な断層の種類は正断層、逆断層、左横ずれ断層、右横ずれ断層のどれか。理由も述べよ。必要に応じて場合分けしても良い。

(1) 中央海嶺 (2) 中央海嶺を区切っているトランスフォーム断層 (3) 大陸プレート同士の衝突境界

**6.5** 一定期間に起きる地震のマグニチュード  $M$  と発生数には  $\log n(M) = a - bM$  という関係が近似的に成り立つことが知られている (グーテンベルグとリヒターの関係)。ここで  $a, b$  は地域や観測期間による定数、 $n(M)$  はマグニチュードが  $M \sim M + dM$  の地震の発生数である。 $dM$  には適当な一定値をとる。

日本周辺での 1961 年から 1991 年の 30 年間におきた地震発生数を規模別に示したものが次表である。この表から横軸に  $M$  縦軸に  $\log n$  をとったグラフを作り  $a, b$  の値を決めよ。またこれらの地震の総エネルギーを積算し、これと最大の地震一回のエネルギーと比較せよ。

$M$	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
発生数	520	471	384	313	254	237	164	175	133	100
$M$	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9
発生数	84	64	49	34	33	23	27	21	14	11
$M$	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
発生数	13	10	5	2	2	3	3	3	2	2
$M$	8.0	8.1								
発生数	0	1								